

27 dez 2004

REC'D 10 JAN 2005

WIPO PCT

PA 1254370

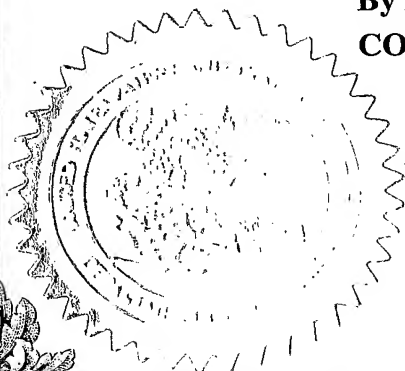
**THE UNITED STATES OF AMERICA****TO ALL TO WHOM THESE PRESENTS SHALL COME:****UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE****United States Patent and Trademark Office****December 02, 2004**

**THIS IS TO CERTIFY THAT ANNEXED HERETO IS A TRUE COPY FROM  
THE RECORDS OF THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK  
OFFICE OF THOSE PAPERS OF THE BELOW IDENTIFIED PATENT  
APPLICATION THAT MET THE REQUIREMENTS TO BE GRANTED A  
FILING DATE UNDER 35 USC 111.**

**APPLICATION NUMBER: 60/528,189****FILING DATE: December 10, 2003****PRIORITY  
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

**By Authority of the  
COMMISSIONER OF PATENTS AND TRADEMARKS**



**L. EDELEN**  
**Certifying Officer**

17691 U.S. PTO  
121003

PTO/SB/16 (08-03)

Approved for use through 07/31/2006. OMB 0651-0032  
U.S. Patent and Trademark Office; U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE

Under the Paperwork Reduction Act of 1995, no persons are required to respond to a collection of information unless it displays a valid OMB control number.

**PROVISIONAL APPLICATION FOR PATENT COVER SHEET**

This is a request for filing a PROVISIONAL APPLICATION FOR PATENT under 37 CFR 1.53(c).

Express Mail Label No.

INVENTOR(S)					
Given Name (first and middle [if any])		Family Name or Surname		Residence (City and either State or Foreign Country)	
Eginhard Werner		VIETZ		Seelze Germany	
Additional inventors are being named on the _____ single _____ separately numbered sheets attached hereto					
TITLE OF THE INVENTION (500 characters max)					
Girth Welding of Pipelines With Fiber Laser					
Direct all correspondence to: CORRESPONDENCE ADDRESS					
<input type="checkbox"/> Customer Number: <div style="border: 1px solid black; width: 200px; height: 30px; display: inline-block;"></div>					
OR					
<input checked="" type="checkbox"/> Firm or Individual Name		KCO Law PLLC			
Address		P.O. Box 220472			
Address					
City	Chantilly	State	VA	Zip	20153-0472
Country		Telephone	8885100695	Fax	7039917071
ENCLOSED APPLICATION PARTS (check all that apply)					
<input checked="" type="checkbox"/> Specification Number of Pages <u>23</u>		<input type="checkbox"/> CD(s), Number _____			
<input type="checkbox"/> Drawing(s) Number of Sheets _____		<input checked="" type="checkbox"/> Other (specify) <u>16 embedded figures, 15 of which are identified by the label "Bild."</u>			
<input type="checkbox"/> Application Date Sheet. See 37 CFR 1.76					
METHOD OF PAYMENT OF FILING FEES FOR THIS PROVISIONAL APPLICATION FOR PATENT					
Applicant claims small entity status. See 37 CFR 1.27.				FILING FEE Amount (\$)	
<input checked="" type="checkbox"/> A check or money order is enclosed to cover the filing fees.				<div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 50px; text-align: center; vertical-align: middle;">\$160.00</div>	
<input checked="" type="checkbox"/> The Director is hereby authorized to charge filing fees or credit any overpayment to Deposit Account Number: <u>50-4822</u>					
<input type="checkbox"/> Payment by credit card. Form PTO-2038 is attached.					
The invention was made by an agency of the United States Government or under a contract with an agency of the United States Government.					
<input checked="" type="checkbox"/> No.					
<input type="checkbox"/> Yes, the name of the U.S. Government agency and the Government contract number are: _____					

[Page 1 of 2]

Respectfully submitted,

SIGNATURE

*Mark E. Olds*

TYPED or PRINTED NAME Mark E. Olds

TELEPHONE 888-510-0695

Date 10 December 2003

REGISTRATION NO. 46507

(if appropriate)

Docket Number: BKP-0101PR

**USE ONLY FOR FILING A PROVISIONAL APPLICATION FOR PATENT**

This collection of information is required by 37 CFR 1.51. The information is required to obtain or retain a benefit by the public which is to file (and by the USPTO to process) an application. Confidentiality is governed by 35 U.S.C. 122 and 37 CFR 1.14. This collection is estimated to take 8 hours to complete, including gathering, preparing, and submitting the completed application form to the USPTO. Time will vary depending upon the individual case. Any comments on the amount of time you require to complete this form and/or suggestions for reducing this burden, should be sent to the Chief Information Officer, U.S. Patent and Trademark Office, U.S. Department of Commerce, P.O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450. DO NOT SEND FEES OR COMPLETED FORMS TO THIS ADDRESS. SEND TO: Mail Stop Provisional Application, Commissioner for Patents, P.O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450.

If you need assistance in completing the form, call 1-800-PTO-9199 and select option 2.

PROVISIONAL APPLICATION COVER SHEET  
Additional Page

PTO/SB/16 (08-03)

Approved for use through 07/31/2006. OMB 0651-0032

U.S. Patent and Trademark Office; U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE

Under the Paperwork Reduction Act of 1995, no persons are required to respond to a collection of information unless it displays a valid OMB control number.

Docket Number BKP-0101PR

INVENTOR(S)/APPLICANT(S)		
Given Name (first and middle [if any])	Family or Surname	Residence (City and either State or Foreign Country)
Frank	Vollertsen	Bremen Germany
Harald	Kohn	Bremen Germany
Claus	Thomy	Bremen Germany

[Page 2 of 2]

Number 1 of 1

WARNING: Information on this form may become public. Credit card information should not be included on this form. Provide credit card information and authorization on PTO-2038.

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

## Girth welding of pipelines with fibre laser

### 5 Inhalt:

- 1. Stand der Technik beim Orbitalschweißen von Pipelines
  - 1.1 Ausgangssituation
  - 1.2 Schweißverfahren und -anlagen
    - 10 1.2.1 Lichtbogen-Handschiessen
    - 1.2.2 Schweißmaschinen
    - 1.2.3 Innershield-Schweißen
    - 1.2.4 MAG-Orbitalschweißen
  - 1.3 Einsatz verschiedener Laserstrahlquellen beim Orbitalschweißen von Pipelines
    - 15 1.3.1 Laserstrahlquellen
    - 1.3.2 Erweiterung der Prozeßgrenzen durch das Laser-Lichtbogen-Hybridschweißen
    - 1.3.3 Aspekte des Lasereinsatzes beim Orbitalschweißen von Pipelines – bisherige Erfahrungen
    - 20 1.3.4 Ergebnisse der Fa. Vietz und des BIAS aus Vorversuchen zum Orbitalschweißen mit dem Faserlaser
- 2 Beschreibung des Verfahrens und des Anlagenkonzeptes

**1. Stand der Technik beim Orbitalschweißen von Pipelines****1.1 Ausgangssituation**

Ein Einsatzgebiet der Schweißtechnik ist der Rohrleitungsbau. Vor Jahrzehnten wurden Rohre durch Muffenverbindungen zusammengefügt, dann durch Schraubenverbindungen und später geschweißt. Dabei handelt es sich um Verbindungen im Durchmesserbereich von 50 mm bis 1.500 mm und im Wanddickenbereich von 2,5 mm bis etwa 25 mm. Während alle übrigen Industriezweige entweder mit stationären Schweißanlagen arbeiten oder zumindest die Schweißarbeiten an einem stationären Produkt durchführen, bewegen sich bei Linienbaustellen des Rohrleitungsbaus die Produktionsmittel am fertigzustellenden Produkt entlang und sind dabei allen Einflüssen der wechselnden Umgebung und der unterschiedlichen Witterung ausgesetzt. Die Schweißarbeiten sind neben dem herzustellenden Rohrgraben oder im Rohrgraben – selbst bei liegender Rohrachse – in Zwangslage durchzuführen. Diese Baustellenbedingungen – beruhend auf der Abhängigkeit von den Witterungsverhältnissen, ungünstigen ergonomischen Voraussetzungen und dem Erfordernis der Anpassung an unterschiedliche Gegebenheiten – sind von größerem Einfluß auf die Güte der Schweißarbeiten als die schweißtechnischen Schwierigkeiten und Schweißverfahren. Aus diesen Gegebenheiten haben sich verschiedene Schweißtechniken entwickelt, aber auch vermehrte Probleme für die Prüfung und Bewertung der Schweißnähte eingestellt. Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung verschiedener Punkte, die für das Erreichen einwandfreier Rohrschweißungen von Bedeutung sind.

Hauptinflussfaktoren für die Herstellung der Schweißverbindungen
<ul style="list-style-type: none"><li>• Rohrmaterial, Abmessungen, Zusatzwerkstoffe</li><li>• Maschinen, Geräte, Vorrichtungen, Werkzeuge</li><li>• Arbeitsvorbereitung, Schweißparameter</li><li>• Rohrschweißer, Arbeitsbedingungen, Aufsicht</li><li>• Witterungs- und Geländeverhältnisse</li><li>• Kenntnisse, Erfahrungen, Verantwortung</li></ul>
↓
Möglichkeiten für die Kontrolle der Schweißnähte
<ul style="list-style-type: none"><li>• Besichtigungen, Oberflächenprüfungen</li><li>• Testnähte (zerstörende Prüfung)</li><li>• US-Prüfung durch Strahlungsprüfung</li><li>• Druckprüfung mit Wasser oder Luft</li></ul>

**1.2.1 Schweißverfahren und -anlagen**

Bei den Schweißverfahren kommen manuelle, teil- oder vollmechanisierte Verfahren oder deren Kombination zur Anwendung. Maßgebend für das gewählte Schweißverfahren sind Kriterien wie Werkstoff, Abmessung, Verwendungszweck und Wirtschaftlichkeit.

**1.2.1 Lichtbogen-Handschiessen**

Immer noch werden – zumindest im Bereich der Bundesrepublik Deutschland – Stahlrohrleitungen fast ausschließlich von Hand, hauptsächlich jedoch durch Metall-Lichtbogenschweißen mit Stabelektroden fallend geschweißt.

**Lichtbogenschweißen in Steignahrttechnik**

Das Lichtbogenschweißen in Steignahrttechnik wird wegen seiner größeren Spaltüberbrückbarkeit und wegen der dickeren Einzelschweißlagen hauptsächlich zum Schweißen einzelner Strang- oder Rohrverbindungsnahte sowie für Reparaturnahte angewandt. Die hauptsächlichsten Fehler wie Schlackeneinschlüsse

und unvollkommene Durchschweißung lassen sich durch zerstörungsfreie Prüfungen erkennen und abstellen. Das Lichtbogen-Handschweißen in der Steigposition ist ab DN 150 einsetzbar. Bei dünner Wanddicke ist besonders auf die Schweißnahtvorbereitung Wert zu legen.

#### **Lichtbogenschweißen in Fallnahttechnik**

Das Lichtbogenschweißen in Fallnahttechnik erlaubt eine hohe Schweißgeschwindigkeit. Nach diesem Schweißverfahren in der Fallnahttechnik werden Rohre ab 2" fallend geschweißt. Vor Jahren hat sich dieses Schweißverfahren auf den Bau von Fernrohrleitungen beschränkt. Heute ist es gang und gäbe und wird bereits im Gasstationsbau oder bei der Gasrohrverlegung im innerstädtischen Bereich eingesetzt. Wesentlich für die einwandfreie Durchführung der Schweißarbeiten ist das genaue Ausrichten der Rohrenden mit geeigneten Zentriervorrichtungen, ein gleichmäßiger Luftspalt, geringer Kantenversatz und die Vermeidung zu hoher Abkühlgeschwindigkeiten der Einzellagen. Um die Fallnahttechnik wirtschaftlich einsetzen zu können, muß man vier Voraussetzungen erfüllen:

- voll ausgebildete Fallnahtschweißer
- geeignete Zentriervorrichtungen (ohne die Rohre heften zu müssen)
- gute Schweißelektroden und
- geeignete Schweißstromquellen, die linearen Gleichstrom erzeugen.

Die Zentriervorrichtungen, die bei der Fallnahttechnik eingesetzt werden, müssen so konstruiert sein, daß das Heften der Rohre entfällt und somit die gesamte Wurzellage in einem Arbeitsgang eingebracht werden kann. Rohraußenzentrierungen für die Fallnahttechnik sind jeweils nur für einen Rohraußendurchmesser anwendbar. Die Außenzentrierung ist innen exakt auf den äußeren Rohrdurchmesser ausgedreht. Man kann sagen, daß mit einer Rohraußenzentrierung dieser Art Rohre bis DN 500 einwandfrei zentriert werden können. Voraussetzung ist jedoch, daß die Rohrenden kalibriert sind. Rohrinnenzentrierungen ab DN 150 sind für die Fallnahttechnik noch besser geeignet. Eine Innenzentrierung sorgt dafür, daß der Kantenversatz innen behoben wird. Weiterhin hat diese Zentrierung den Vorteil, daß von außen keine Behinderung während des Schweißvorganges auftritt. Ein weiterer Vorteil ist, daß bei einer Innenzentrierung die Rohre besser gehalten werden, so daß bei Belastung keine Risse in der Wurzellage entstehen können. Das exakte Einstellen des Luftspalts ist Voraussetzung für die Güte der Schweißnaht. Der Luftspalt muß gleichmäßig sein und etwa 1,5 mm betragen (je nach Wanddicke des Rohres).

#### **1.2.2 Schweißmaschinen**

Die Schweißmaschinen für den Pipelinebau müssen besondere Eigenschaften haben. Die vor Jahren eingesetzten Schweißaggregate haben sich im wesentlichen von der Konzeption bis heute nicht geändert. Als Verbrennungsmotor wird ein Dieselmotor – in der Regel luftgekühlt – eingesetzt, und als Schweißgenerator ein Bürstengenerator, welcher linearen Gleichstrom mit Plus und Minus erzeugt. Celluloseumhüllte und basische Fallnahtelektroden sind sehr dünn umhüllt und dementsprechend anfällig gegen Stromschwankungen, sei es bedingt durch unterschiedliche Drehzahlen oder aber, wenn die Leerlaufspannung zu niedrig ist, daß das Zünden Probleme bereitet. Die Entwicklung auf dem Weltmarkt läßt erkennen, daß erst jetzt Schweißmaschinen mit der Invertertechnologie ausgestattet werden, womit gleiche Schweißeigenschaften zu erzielen sind wie mit den 40 Jahre alten Bürstenschweißgeneratoren. In vielen Ländern der Welt wird die Pipeline nach wie vor von hand fallend mit Schweißmaschinen geschweißt, die älter als 30 Jahre sind. In diesen Ländern spielt der Faktor Lohn kaum eine Rolle und dementsprechend sind moderne Schweißverfahren wie das Innershield oder das MAG-Orbitalschweißen aus Kostengründen nicht gefragt. Jede neue Entwicklung auf dem Sektor Schweißen im Pipelinebau wird zunächst einmal von der Kostenseite

untersucht, weniger von der Schweißnahtqualität. Die verwendeten Rohrstähle, z.B. X65, sind gutmütig und lassen sich auch unter diesen Bedingungen mit Elektroden einwandfrei verschweißen.

### 5 1.2.3 Innershield-Schweißen

Eine Weiterentwicklung und eine Steigerung der Abschmelzleistung bringt das Innershield-Schweißen. Dieses Verfahren wurde von der amerikanischen Firma Lincoln entwickelt und wird heute in großem Umfang von chinesischen  
10 Gesellschaften eingesetzt, aber auch von russischen und indischen Pipelinefirmen. Als Stromquelle wird ein Schweißaggregat mit umschaltbarer Kennlinie benötigt oder aber ein Schweißgleichrichter oder ein Schweißinverter. Schweißaggregate, wie sie auch die Fa. Vietz herstellt, können sowohl mit fallender Kennlinie Elektroden verschweißen und mit konstanter Kennlinie Innershield schweißen. Bis vor kurzem  
15 gab es nur einen Drahthersteller, die Fa. Lincoln. Da das Patent abgelaufen ist, stellt nun sowohl die Fa. Hobart (USA), aber auch die Fa. ELGA (Schweden) derartige Drähte her. Bisher war es nur möglich, nach der Wurzel alle Füll- und Decklagen zu schweißen und die Wurzel mußte von Hand geschweißt werden. Durch die Weiterentwicklung des Drahtes der Firmen Hobart und ELGA ist es möglich, auch die  
20 Wurzel in der Über-Kopf-Position einwandfrei zu schweißen. Die Schweißdrähte sind in der Regel 1,9 mm oder 2,0 mm dick. In die Drähte sind Pulverpartikelchen über den gesamten Querschnitt verteilt eingewalzt, was für die Stabilität des Lichtbogens sorgt, aber auch für eine schützende Glocke, damit keine Luftatmosphäre in das Schmelzbad eindringen kann. Auch hier müssen die Schweißer geschult werden, weil  
25 dieses Verfahren ganz bestimmte Spezifikationen hat, die unbedingt eingehalten werden müssen. Zum Beispiel muß das freie Drahtende 2 cm betragen, um in allen Positionen einwandfrei schweißen zu können. Die Abschmelzleistung beträgt 2,6 kg pro Stunde. Das ist eine erhebliche Steigerung gegenüber dem Schweißen mit Cellulose-Elektroden, wo eine Abschmelzleistung von nur 1,7 kg pro Stunde erzielt wird. Ein weiterer Vorteil ist, daß in den Positionen von 12 Uhr bis 6 Uhr in einem durchgeschweißt werden kann, weil der Draht kontinuierlich über einen Drahtvorschubkoffer transportiert wird und somit der Schweißer in der Lage ist, die gesamten Naht zu schweißen, ohne absetzen zu müssen. Von Vorteil ist es, wenn an  
35 der Schweißpistole, die besonders geformt ist, ein zusätzlicher Stufenschalter angebracht ist, so daß die Leistung (Drahtvorschub und Spannung) reduziert wird, wenn in der Überkopfposition geschweißt wird. Um einwandfrei schweißen zu können, müssen die Schweißer geschult werden. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens sind die geringen Investitionskosten, um diese erhebliche Schweißleistung zu erzielen. Die anfänglichen Einschränkungen, die es in Deutschland für das Verschweißen dieses Drahtes gab – Freisetzen von Barium – sind bedeutungslos und haben bisher keinerlei Einschränkung bei Einsätzen im Pipelinebau erfahren. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, daß die Schweißnahtqualität jeweils von der Tagesform des Schweißers abhängt. Somit wird die Qualität der Schweißnaht einzig und allein von dem Schweißer und dessen Können beeinflusst.

45

### 1.2.4 MAG-Orbitalschweißen

Um von der Tagesform des Schweißers nicht abhängig zu sein, haben sich viele Experten Gedanken gemacht, um ein automatisches oder halbautomatisches  
50 Schweißverfahren zu entwickeln. Die Anfänge sind bis in die siebziger Jahre zurückzuverfolgen, mit mehr oder weniger geringem Erfolg. Die ersten Einsätze fanden an der Pipeline von Drusba in Rußland in die damalige DDR statt. Die damaligen DDR-Kombinate hatten von der Regierung die Auflage, automatische Schweißverfahren zu entwickeln und einzusetzen, um auf diesem Sektor eine Weltmachtstellung zu erzielen. Leider sind alle Versuche fehlgeschlagen, weil die  
55 Rahmenbedingungen nicht gegeben waren, mit moderner Elektronik und Steuerung



5 sowie mit den Stromquellen diese Vorgaben zu realisieren. Die Fa. Vietz hat ihr  
erstes System Ende der siebziger Jahre für ein Fernwärmeprojekt in Dänemark  
eingesetzt. Hier wurden in einem unterirdischen Tunnel Fernwärmerohre von einem  
Teil Kopenhagens unter dem Hafenbecken hindurch zum anderen Teil Kopenhagens  
verlegt. Hier hatte der Auftraggeber vorgeschrieben, die Wurzel WIG zu schweißen  
und alle weiteren Füll- und Decklagen MAG-Orbital steigend mit einem Fülldraht in  
pendelnder Ausführung. Die Reparatur betrug 0,5%. Alle Versuche, dieses Verfahren  
in eine Linienbaustelle einfließen zu lassen, sind fehlgeschlagen. Auch das  
Schweißen der Wurzel mit celluloseumhüllten Elektroden und dann erst das MAG-  
Orbitalschweißen von unten nach oben einzusetzen, haben die Erfolge nicht  
gebracht.

#### Aktueller Stand der MAG-Orbital-Schweißtechnik

15 Die MAG-Orbital-Schweißtechnik im Pipelinebau ist ein wirtschaftliches  
Schweißverfahren. Je nachdem, wie lang die Pipeline ist und welche Rohrdimension  
verschweißt werden soll, gibt es unterschiedliche Varianten. Bei diesen  
unterschiedlichen Varianten werden die Investitionskosten sowie die  
Schweißgeschwindigkeit und dementsprechend die Wirtschaftlichkeit berücksichtigt.  
Um den genauen Bedarf der Pipelinebaufirma ermitteln zu können, sind folgende  
Angaben erforderlich:

- Wie viele Kilometer Pipeline sollen in welcher Zeit geschweißt werden?
- Welchen Rohrdurchmesser hat die Pipeline?
- Welche Wanddicke hat das Rohr?
- Welche Beschaffenheit hat das Gelände, eben oder bergig?
- Welche Umgebungstemperaturen liegen vor, hoch oder niedrig?
- Welche Bauzeit muß eingehalten werden?
- Hat das Unternehmen ausreichend Fachkräfte, z.B. Speziaalschweißer und  
Elektroniker?

Es gibt zur Zeit vier Varianten auf dem Weltmarkt, die eingesetzt werden:

#### • Variante 1:

Diese Variante ist die kostengünstigste, aber auch die langsamste.  
Dementsprechend ist sie für kürzere Pipelinebaustellen einzusetzen. Die  
Rohre werden – wie sie aus der Fabrik kommen – mit einem Luftspalt von 1,5  
mm bis 3 mm Abstand mit einer pneumatischen Innenzentrierung zentriert und  
fixiert. Die Wurzel wird von Hand mit der cellulosen / basischen Elektrode von  
oben nach unten oder mit einem MAG-Gerät von Hand mit Metallpulverdraht  
von 1,0 mm von oben nach unten geschweißt. Nach Fertigstellung der Wurzel  
wird ein Spannband um das Rohr arretiert, an dem mit zwei MAG-  
Orbitalköpfen von unten nach oben mit einem Fülldraht alle Zwischenlagen  
und die Decklagen geschweißt werden. Für den Schweißprozeß wird ein  
Schutzgas CO<sub>2</sub> + Argon benötigt. Der erste Schweißer beginnt in der Position  
6 Uhr und schweißt pendelnd mit Verweilzeiten links und rechts alle Füll- und  
Decklagen bis zur Position 12 Uhr. Der zweite Schweißer beginnt zeitversetzt  
ebenfalls bei der Position 6 Uhr und schweißt bis zur Position 1 Uhr, um eine  
Überlappung der Schweißnaht zu bekommen. Diese Variante ist einsetzbar  
beim Verlegen von Fernwärmerohren im Tunnelbau, Wasserleitungen im  
Tunnelbau, aber auch für Gasspeicher größerer Dimension, z.B. 2.500 mm,  
vor allem aber bei Wanddicken zwischen 15 mm und 30 mm. Die  
Abschmelzleistung beträgt 3,1 kg pro Minute. Gegenüber dem  
Fallnahtschweißen mit Cellulose-Elektroden mit 1,7 kg pro Minute ist diese  
Variante doppelt so schnell wie das Schweißen mit der Elektrode mit  
celluloseumhüllten Elektroden.

- **Variante 2:**

Diese Technologie ist wesentlich schneller als Variante 1, aber die Investitionskosten sind auch erheblich. Um nach dieser Variante schweißen zu können, benötigt man eine Fasing-Maschine mit einem Hydraulikaggregat. Alle Rohre müssen auf der Baustelle mit einem Seitenbaum einzeln angehoben werden, so daß am Ende die Fasing-Maschine eingeführt werden kann, um die Rohrenden entsprechend dieses Schweißverfahrens mit einer speziellen Schweißnahtvorbereitung auszustatten. Die Fugenform entspricht einer Tulpe mit einem Steg von ca. 2 mm mit einem geringen Öffnungswinkel, wobei wenig Zusatzwerkstoff wegen des geringen Nahtvolumens benötigt wird. Um das Wurzelschweißen von außen qualitativ zu beherrschen, ist es erforderlich, eine pneumatische Innenzentriervorrichtung mit Kupferbacken einzusetzen. Die Aufgabe der Kupferbacken ist es, daß flüssige Schweißgut zu stützen, um eine hundertprozentige Wurzel zu erzielen, bei der beide Rohrrinnenkanten miteinander verschweißt sind und ein Wurzeldurchhang von maximal 1 mm gewährleistet ist. Nachdem die Rohrenden bearbeitet sind, wird das Rohr mittels der pneumatischen Innenzentrierung mit Kupferbacken zentriert. An einem der Rohrenden muß zuvor das Spannband montiert werden, an dem zwei MAG-Orbitalköpfe die Wurzel von 12 Uhr nach 6 Uhr schweißen. Die Rohrenden werden ohne Luftspalt zentriert, so daß – beginnend bei 12 Uhr – der erste Kopf den Steg mit einer hohen Stromleistung aufschmilzt und das flüssige Schweißgut von den Kupferbacken gestützt wird. Der zweite Kopf startet ebenfalls bei 12 Uhr, wenn der erste Kopf die Position 2 Uhr erreicht hat. Um in der Wurzel keine Fehler zu bekommen, ist es wichtig, daß die Stromversorgung für die Inverter oder Gleichrichter so konstant ist, daß sich die Schweißparameter während des Zuschaltens des zweiten Kopfes nicht verändern. Mit einer Schweißraupe, z.B. des Typs ARCOBIL II oder IV ist dies gewährleistet, da damit eine konstante Drehzahl – bedingt durch den hydraulischen Antrieb – garantiert werden kann, welcher im Millisekundenbereich reagiert, um die Stabilität des Lichtbogens bei einer Frequenz von 50 Hz zu erhalten. Durch die unterschiedlichen Schweißpositionen – waagrecht, fallend und über Kopf – ist es damit möglich, die Stromquellen so zu programmieren, daß entsprechend der Position jeweils eine Stromanpassung sowie die Anpassung der Drahtgeschwindigkeit erfolgt. Dies ist vollautomatisch, halbautomatisch, aber auch manuell regelbar. Die beiden Köpfe schweißen den Hotpass nach gleichen Kriterien von oben nach unten. Nach Fertigstellung der zweiten Lage werden die Köpfe vom Spannband entfernt und zum nächsten Schweißstoß transportiert. Ein nachfolgendes Paar schweißt Füllagen ebenfalls von oben nach unten, ohne daß der Brenner pendelt. Je nach Wanddicke des Rohres können bis zu 5 Stationen eingesetzt werden, wobei insgesamt 10 Schweißköpfe im Einsatz sind und benötigt werden. Es wird mit Massivdraht geschweißt und je nach Schweißlage mit einer unterschiedlichen Gaszusammensetzung gearbeitet. Es ist empfehlenswert, eine automatische Gasmischanlage auf der Schweißraupe zu installieren oder gas aus Flaschen zu verwenden, in denen das Gemisch fertig angeliefert wird. Die Abschmelzleistung dieser Variante beträgt 5,1 kg pro Stunde mit Massivdraht, was eine wesentliche Steigerung der Schweißgeschwindigkeit und der Tagesleistung darstellt. Die Schweißnahtqualität ist gut bis sehr gut. Eine maximale Reparaturquote von 3-5% ist gegeben.

- **Variante 3:**

Für die Variante 3 wird ein Innenschweißkopf benötigt, um die Wurzel von innen zu schweißen. Vier Brenner schweißen – beginnend von Position 12 Uhr bis 6 Uhr – die Wurzel überlappend von der einen Hälfte des Rohres und vier Brenner von oben nach unten die andere Hälfte des Rohres. Das

Schweißen der Wurzel an einem 1.200 mm Rohr dauert ca. 3 Minuten. Um diese hohe Schweißgeschwindigkeit zu erzielen, sind die Investitionskosten entsprechend sehr hoch. Um auf der Baustelle diese Tagesleistung zu erzielen, ist zu beachten, daß ein Schweißkopf im Ersatz vorgehalten wird, falls die Innenschweißeinrichtung repariert oder gewartet werden muß. Das Schweißen der Füll- und Decklagen erfolgt wie bei der Variante 2 mit Massivdraht von oben nach unten. Die Stromquellen können programmierbar sein oder die Regelung erfolgt manuell oder halbautomatisch, je nachdem, wie qualifiziert das Bedienungspersonal ist. Die Abschmelzleistung bei diesem Verfahren ist 5,9 kg pro Stunde und somit ist dies das schnellste, aber auch das kostenintensivste Schweißverfahren. Die Investitionskosten sind aber in Relation zur Tagesleistung und zur Länge der Pipeline zu sehen, die verschweißt wird. In vielen Fällen lohnt sich diese hohe Investition und nach kürzester Zeit hat sich dieses Verfahren amortisiert.

• **Variante 4:**

Eine Weiterentwicklung beim MAG-Orbitalschweißen ist die Ausrüstung eines Schweißkopfes mit zwei Brennern und zwei Drähten sowie die Ausrüstung mit zwei Brennern und vier Drähten. Die Schweißgeschwindigkeit erhöht sich um 100%, wenn mit zwei Brennern geschweißt wird und um 400%, wenn mit zwei Brennern und vier Drähten geschweißt wird. Diese Technologie kann nur eingesetzt werden, wenn die Rohre größer als 1.000 mm im Durchmesser sind und eine Wanddicke von > 20 mm haben. Die Schweißnahtvorbereitung muß entsprechend des Verfahrens angeglichen werden. Es ist zu beachten, daß auf der eingesetzten Schweißraupe eine Erweiterung auf 8 Stromquellen erfolgt, um die beiden an einem Band geführten Köpfe mit 4 Drähten bedienen zu können. Es ist wichtig, daß die Stromquellen miteinander kommunizieren und synchron für 4 Stück pulsen können. Dies ist z.B. mit einem speziell für diesen Zweck konstruierten Multi-Inverter möglich. Um diese Schweißköpfe mit vier Brennern einsetzen zu können, ist eine umfangreiche Schulung des Bedienungspersonals erforderlich. Die jeweiligen Baustellenkriterien müssen berücksichtigt werden, um die gewünschte Tagesleistung mit diesem Verfahren zu erzielen. Um eine noch höhere Schweißgeschwindigkeit auf der Baustelle zu erzielen, ist es möglich, jeden Schweißkopf mit zwei Brennern und zwei Drähten auszustatten oder aber mit zwei Brennern je zwei Drähten. Die Investitionskosten sind erheblich, aber auch die Abschmelzleistung und Schweißgeschwindigkeit. Um bei allen vier Varianten des MAG-Orbitalschweißens optimale Schweißergebnisse zu erzielen, ist es erforderlich und unabdingbar, daß der Schweißprozeß unter einem geeigneten Schweißzelt stattfindet. Das Schweißzelt muß so konzipiert sein, daß während des Schweißprozesses keine Zugluft in das Zelt gelangen kann. Des weiteren müssen die Türen so gesichert sein, daß während der Schweißarbeiten kein Fremdzugang von außen möglich ist. Klimatisierte Zelte müssen ebenfalls Zugluftfrei gestaltet sein, um den Schweißprozeß nicht nachteilig zu beeinflussen. Die Schweißnahtqualität hängt zum großen Teil von der Konstruktion des Schweißzeltes ab.

Alle oben beschriebenen vier Varianten des MAG-Orbitalschweißens sind technisch ausgereift, setzen aber voraus, daß alle Rahmenbedingungen eingehalten werden, um erstklassige Schweißnähte zu produzieren.

**Abschlußbetrachtung des MAG-Orbital-Schweißens**

Das MAG-Orbital-Schweißen ist durch hohe Reparaturquoten, Ausfallzeiten durch Witterungseinflüssen sowie Beeinträchtigungen der Schweißnahtqualität durch das Bedienungspersonal an seinen Grenzen angekommen. Das Bedienungspersonal der MAG-Orbital-Schweißköpfe muß hochqualifiziert sein, nicht nur auf dem Sektor Schweißtechnik, sondern auch auf dem elektronischen Sektor. Schweißparameter,

die den Schweißprozeß in den unterschiedlichen Schweißpositionen vollautomatisch beeinflussen, haben den Nachteil, daß irgendwelche Veränderungen von außen – seien es Spritzer, die unkontrolliert beim Schweißen entstehen können, oder auch Einflüsse aus der Atmosphäre – voraussetzen, daß der Schweißer sofort eingreift und den Schweißprozeß manipuliert, um die Fehler zu minimieren. Das Schweißen der Wurzel mit dem Innenkopf ist sehr schnell, aber auch sehr kostenintensiv, vor allem aber ist auch die Wurzellage oft mit sehr vielen Schweißfehlern behaftet. Am Beginn der Wurzel – und dies viermal versetzt – ist es möglich, daß sich beim Ansetzen Poren bilden und diese sich beim Überschweißen mit dem nachfolgenden Brenner bis in die obere Nahtschicht ausbilden und nach dem Schweißen mechanisch beseitigt werden müssen. Es ist also erforderlich, daß ein Schweißer von innen und mit einem Handschweißgerät die Wurzel nachschweißt. Erst dann können weitere Schweißprozesse von außen erfolgen. Die hohen Investitionskosten und das viele gut ausgebildete Personal haben diesem Verfahren nicht zum Durchbruch verholfen. Ob mit zwei oder vier Drähten an einem Kopf geschweißt wird – die Probleme werden nicht geringer sondern umfangreicher. Es gibt wenige Firmen, die sich ein derartiges System zugelegt haben. Weltweit haben die Hersteller Dienstleistungsunternehmen aufgebaut und bieten als Subcontractor ihre Leistung des Schweißens an. Dies hat Vor- und Nachteile. Zu empfehlen ist jedoch, daß jedes große Pipelineunternehmen solche Arbeiten mit eigenen Geräten ausführen sollte, um unabhängig zu sein. Aufgrund dieser unterschiedlichen Erfahrungen hat die Fa. Vietz die verschiedensten Laserschweißsysteme untersuchen lassen, um die Lasertechnologie auch im Pipelinebau einsetzen zu können.

### 1.3 Einsatz verschiedener Laserstrahlquellen beim Orbitalschweißen von Pipelines

#### 1.3.1 Laserstrahlquellen

Das Kunstwort LASER ist ein Akronym für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ (= Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission) und ist strenggenommen nur die Beschreibung eines physikalischen Vorgangs, dessen Grundprinzip erstmals im Jahre 1917 von Einstein postuliert wurde. Dennoch hat es sich seit seiner ersten praktischen Realisierung als Bezeichnung für das Gerät, in dem dieser Vorgang vonstatten geht, eingebürgert. Bereits seit den 1970er Jahren wird der Laser für viele Aufgaben in der Materialbearbeitung (z.B. Schweißen, Schneiden, Härten usw.) erfolgreich eingesetzt, und noch heute weist die Lasertechnik zweistellige Zuwachsraten auf, da längst nicht alle Anwendungspotentiale erschlossen sind. Wesentlich für den Durchbruch des Lasers im Einsatzgebiet des thermischen Fügens und Trennens waren und sind dabei einige spezifische Eigenschaften, die auf dem physikalischen Grundprinzip beruhen.

#### Das Grundprinzip des Lasers

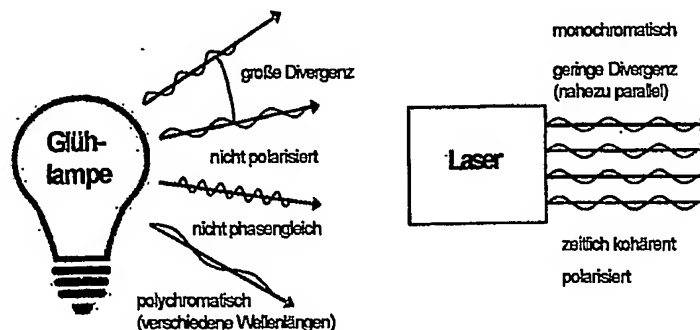


Bild 1: Vergleich Glühlampe – Laser

Bei einem Laser handelt es sich um ein Gerät zur Erzeugung und Verstärkung von monochromatischem und kohärentem Licht mit geringer Strahldivergenz (Bild 1). Aufgrund dieser Eigenschaften kann das Laserlicht sehr gut fokussiert werden, so daß außerordentlich hohe Energiedichten  $> 10^6 \text{ W/cm}^2$  erreicht werden können, die eine effiziente Materialbearbeitung i.d.R. erst ermöglichen.

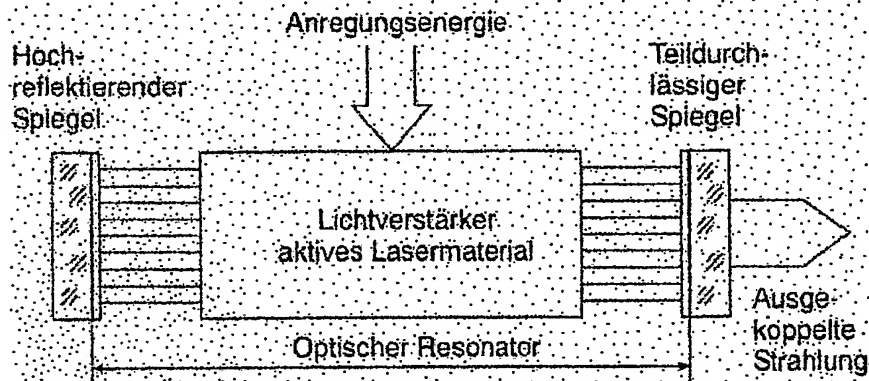


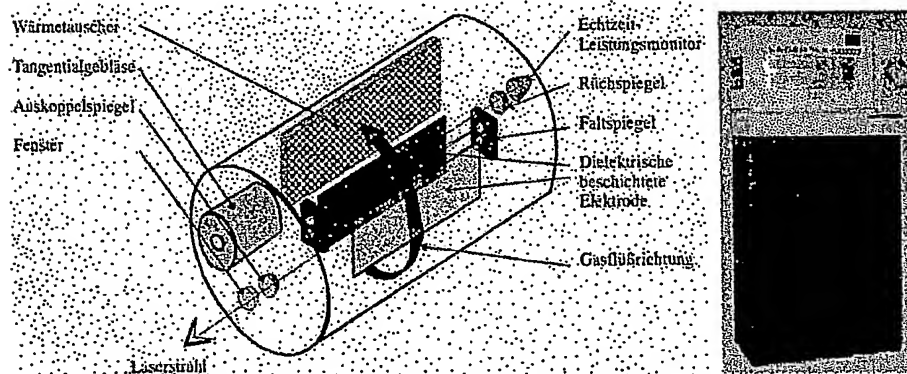
Bild 2: Prinzip des Lasers

Ein Laser besteht grundsätzlich aus einem laseraktiven Medium, einer Anregungsquelle und einem optischen Resonator (Bild 2). Im Resonator wird das laseraktive Medium (z.B. Gasmoleküle, Ionen) durch Energieeinbringung mittels der Anregungsquelle (z.B. elektrische Gasentladung, Blitzlampen) angeregt, d.h. auf ein höheres Energieniveau gebracht (sog. „Pumpen“). Beim Zurückfallen auf das Ausgangsniveau wird die Energie in Form eines Lichtquants frei, wobei die emittierte Wellenlänge charakteristisch für das jeweilige laseraktive Medium ist.

#### Prinzip und Eigenschaften verschiedener Hochleistungslaserstrahlquellen

Zahlreiche Atome, Moleküle und Ionen lassen sich zur Emission von Laserlicht anregen. Die Lasertypen werden dabei anhand ihres laseraktiven Mediums in Gruppen eingeteilt und unterscheiden sich hauptsächlich im Hinblick auf die Wellenlänge und die Intensität der Laserstrahlung. Beim Laserstrahlschweißen kommen industriell Gaslaser (CO<sub>2</sub>-Laser), Festkörperlaser (z.B. Nd:YAG-Laser) und Diodenlaser (HLDL) (z.B. GaAs) zum Einsatz.

#### • Der CO<sub>2</sub>-Laser

Bild 3: Prinzipieller Aufbau eines quergeströmten CO<sub>2</sub>-Lasers; CO<sub>2</sub>-Laserstrahlquelle

Der prinzipielle Aufbau eines Lasers (Bild 2) gilt auch für den CO<sub>2</sub>-Laser (Bild 3). Der zwischen den beiden Spiegeln angeordnete Resonator ist mit einem Gasgemisch aus CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> und He im Verhältnis 1:2:10 gefüllt. Durch das Anlegen einer Spannung wird im Resonator zwischen zwei Elektroden eine Niederdruck-Gasentladung gezündet. Hierbei wird der Stickstoff durch Elektronenstöße angeregt und überträgt seine Schwingungsenergie auf das Kohlendioxid, das auf diese Weise gepumpt wird. Dieser „Umweg“ ist erforderlich, da das CO<sub>2</sub> keinen sehr großen Wirkungsquerschnitt auf einen Elektronenstoß hat. Das Helium schließlich kühlt aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit das Gasgemisch und trägt so zu einer Stabilisierung des Prozesses bei. Zur Aufrechterhaltung der Strahlungsemission muß das Gasgemisch fortwährend regeneriert werden, was durch entsprechende Umwälzung mit Gaspumpen und Kühlung durch Wärmetauscher erreicht wird.

CO<sub>2</sub>-Laser emittieren Laserlicht mit einer Wellenlänge von 10,6 µm und besitzen bei heute in der Materialbearbeitung üblichen Strahlleistungen von wenigen hundert Watt bis derzeit etwa 40 kW einen Wirkungsgrad von ca. 10%.

Die Größe der Laseranlage und die notwendigen Bearbeitungskosten werden vom jeweiligen Anwendungsfall bestimmt. Die Gesamtkosten für ein Bearbeitungssystem setzen sich aus den Kosten für den Laser (ca. 35 - 40%) und den Kosten für die übrigen Elemente (ca. 60 - 65%) einschließlich Gasversorgung, Kühler, Strahlführung (die beim CO<sub>2</sub>-Laser über relativ aufwendige Spiegeloptiken geschehen muß), Bearbeitungskopf, usw. zusammen. Für ein komplettes System zum Längsnahtschweißen von Rohren direkt vom Band, das mit einem CO<sub>2</sub>-Laser mit 10 kW Strahlleistung ausgerüstet ist, ist einschließlich der benötigten umformtechnischen Komponenten mit Investitionskosten von insgesamt etwa 2,5 Mio. € zu rechnen, wobei die Strahlquelle allein ca. 550.000 € kostet.

- **Der Nd:YAG-Laser**

Bei einem Festkörperlaser wie dem Nd:YAG-Laser besteht das aktive Medium aus einem i.d.R. künstlich hergestellten stabförmigen Einkristall (Yttrium-Aluminium-Granat YAG), in dessen Kristallgitter Fremdatome (Neodym Nd) eingelagert sind (Dotierung), wobei die Fremdatome die eigentlichen laseraktiven Bestandteile sind. Der Einkristall ist zwischen den Resonatorspiegeln angeordnet und wird durch „optisches Pumpen“ i.d.R. mittels Bogenlampen (Xenon- oder Krypton-Lampen) oder Laserdioden angeregt. Zur besseren Ausnutzung der Anregungsenergie werden doppelt-elliptische Reflektoren eingesetzt (Bild 4).

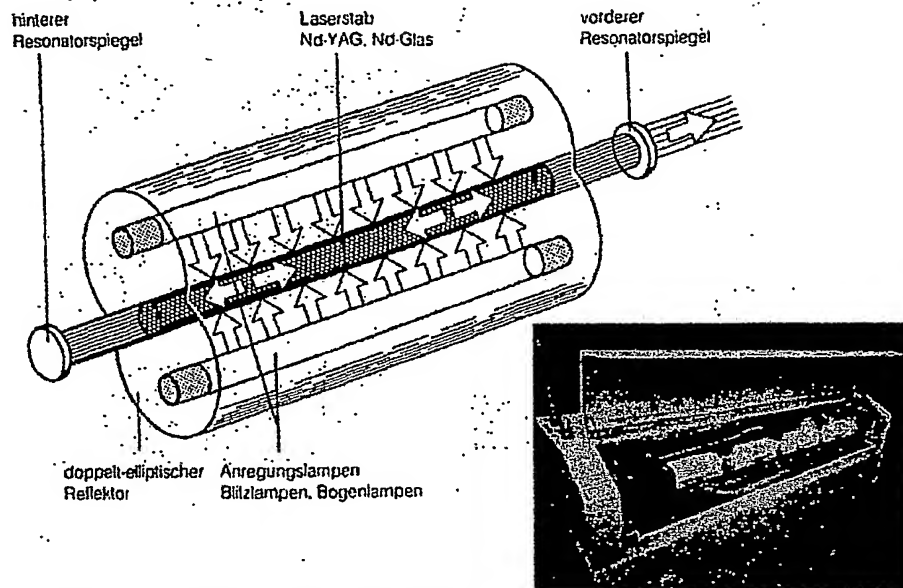


Bild 4: Prinzipieller Aufbau eines Nd:YAG-Lasers; Nd:YAG-Laserstrahlquelle

Der solchermaßen erzeugte Strahl kann im Gegensatz zum CO<sub>2</sub>-Laserstrahl über Lichtwellenleiter (Glasfasern) geführt werden, was eine erheblich flexiblere Aufstellung der Strahlquelle und Handhabung des Nd:YAG-Laserstrahls ermöglicht.

Nd:YAG-Laser emittieren Laserlicht mit einer Wellenlänge von 1,064  $\mu\text{m}$ , wobei industriell verfügbare, lampengepumpte Systeme für die Materialbearbeitung eine Strahlleistung von etwa 10 W bis max. 6 kW im Dauerstrichbetrieb (cw = continuous wave) besitzen. Durch die Verwendung von Dioden-Arrays anstelle von Bogenlampen ist bei allerdings erheblich höheren Investitionskosten eine Erhöhung des Wirkungsgrades auf bis zu ca. 10% möglich.

In Abhängigkeit vom Anwendungsfall ergeben sich für eine robotergeführte Laserschweißanlage mit manueller Bestückung beim Einsatz eines derzeit leistungsstärksten industriell verfügbaren Nd:YAG-Lasers mit 4 kW Strahlleistung (ca. 400.000 €) Investitionskosten von ca. 600.000 €.

• Der Diodenlaser (HLDL)

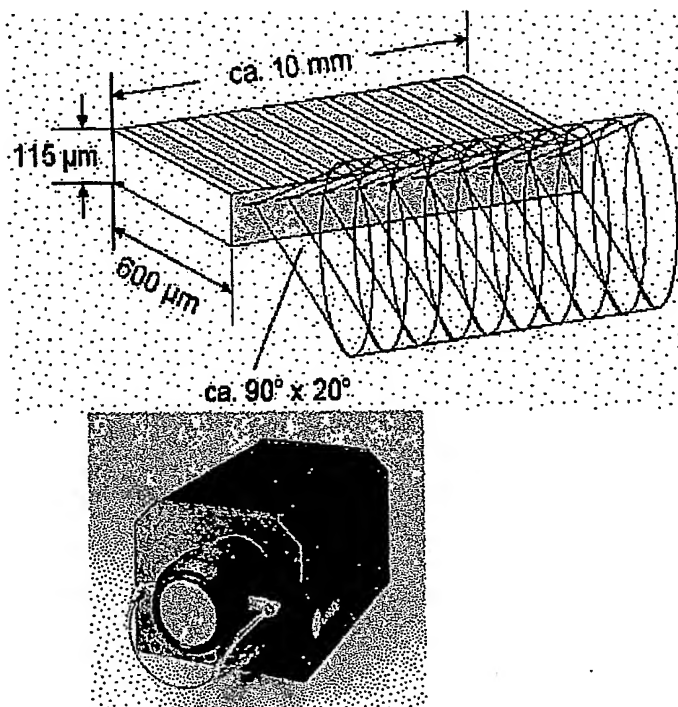


Bild 5: Prinzipieller Aufbau eines Diodenlaser-Barrens; direktstrahlender Diodenlaser (rechts)

Bei Diodenlasern (HLDL) wird der Laserstrahl von Laserbarren (Stacks) aus Halbleitermaterial erzeugt. Bei Anlegung einer bestimmten Spannung an einen geeignet dotierten Halbleiter (z.B. GaAs) werden bei der Rekombination von Elektronen und „Löchern“ im pn-Übergangsbereich Lichtquanten emittiert. Die aktive Zone wird dabei durch die p- bzw. N-dotierten Zonen des Halbleiters, die einen niedrigeren Brechungsindex aufweisen, so begrenzt, daß sich die erzeugte Strahlung wie in einem Wellenleiter befindet und nur in Längsrichtung aus der Kante des Kristalls austritt. Um eine höhere Strahlleistung zu erhalten, werden ca. 25 Emitter zu einem Subarray zusammengefaßt, die wiederum zu einem sogenannten Diodenlaserbarren kombiniert werden und durch ihre räumliche Anordnung die Strahlcharakteristik mitbestimmen (Bild 5). Aus einem Barren kann je nach Kühl- und Montagetechnik eine Leistung von 10 bis 40 W entnommen werden. Um nun in Leistungsbereiche zu gelangen, die für die Makromaterialbearbeitung interessant sind, werden mehrere Diodenlaserbarren zu einem sog. „Stack“ zusammengesetzt, wobei die Teilstrahlen in geeigneter Weise kollimiert und fokussiert und entweder direkt oder mittels Lichtwellenleiter auf das Werkstück geführt werden. Aufgrund dieser Besonderheiten der Strahlentstehung erreicht die Strahlqualität von Diodenlasern derzeit auch nicht die Größenordnung von Festkörperlasern oder CO<sub>2</sub>-Lasern, so daß aufgrund der verfügbaren Intensitäten von etwa  $5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  derzeit i.d.R. nur Wärmeleitungsschweißen möglich ist.

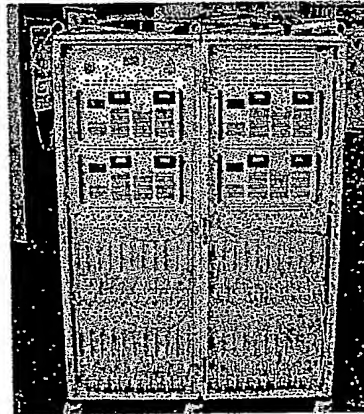
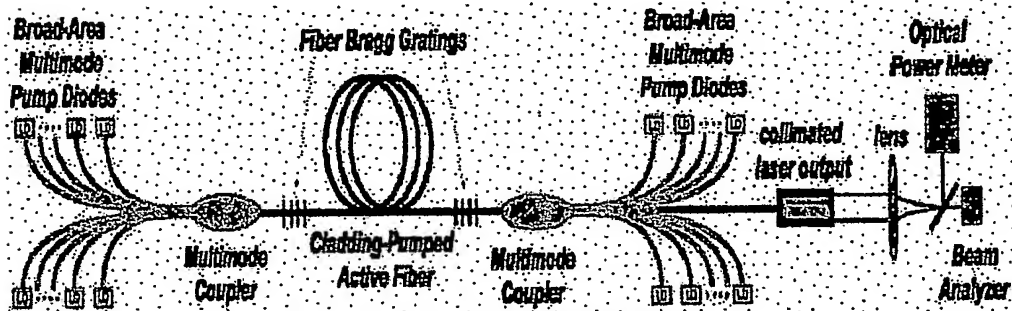
Die Wellenlänge von Diodenlasern liegt je nach Dotierung des verwendeten Halbleitermaterials zwischen 0,78 und 0,94 µm, wobei bei einem Wirkungsgrad von 35 – 50% derzeit Strahlleistungen bis 4 kW (fasergekoppelt) oder 6 kW (direktstrahlend) industriell verfügbar sind.



Für eine roboterbasiertes HLDL-Bearbeitungsanlage mit 6 kW Strahlleistung (Laserlistenpreis ca. 330.000 €) ist derzeit mit Investitionskosten von etwa 480.000 € zu rechnen.

5

# • Der Hochleistungs-Faserlaser



10

Bild 6: Prinzipieller Aufbau eines Hochleistungs-Faserlasers; Hochleistungs-Faserlaser mit 6,9 kW Strahlleistung am Werkstück

15

Der Faserlaser gehört wie der Nd:YAG-Laser zur Gruppe der Festkörperlaser. Das laseraktive Medium besteht i.d.R. aus einer Ytterbium-dotierten Glasfaser, die an ihren Enden und an der Mantelfläche mittels Dioden optisch gepumpt wird (Bild 6). Die Wellenlänge liegt bei 1,07  $\mu\text{m}$ , wobei bei einem Wirkungsgrad von mehr als 20% derzeit im Rahmen von Vorserienmodellen Strahlleistungen bis 10 kW verfügbar sind.

20

Die geschätzten Investitionskosten für einen Hochleistungs-Faserlaser mit 10 kW Strahlleistung betragen derzeit etwa 900.000 € für die Strahlquelle.

25

30

**Vergleich der Strahlquellen**

Tabelle 1: Vergleich der Eigenschaften unterschiedlicher Laserstrahlquellen

		CO <sub>2</sub> -Laser	Nd:YAG-Laser	HLDL	Hochleistungs-Faserlaser
Wellenlänge	[µm]	10,6	1,064	0,78 .. 0,94	1,070
Max. Strahlleistung	[kW]	40	5	6	10
Wirkungsgrad	[%]	10	3 .. 10	35 .. 50	> 20
Strahlführung		Spiegeloptik	Faser	Faser / direktstrahlend	Faser
Eignung zum Dickblechschweißen		+	0	-	+
Mobilität		-	-	0	+
Robustheit		-	-	0	+
Anforderungen bzgl. Lasersicherheit		+	0	0	0
Preis Strahlquelle	[€]	550.000 [10 kW]	410.000 [4 kW]	330.000 [6 kW]	900.000 [10kW]
Preis Strahlquelle	[€ / kW]	55.000	102.500	55.000	90.000

+ = gut

0 = neutral

- = schlecht

- 5      Tabelle 1 gibt eine zusammenfassende Übersicht über die wesentlichen Eigenschaften derzeit verfügbarer Hochleistungsstrahlquellen.

10      Im Hinblick auf das Orbitalschweißen im Pipelinebau unter Feldbedingungen dürfte vermutlich hingegen primär der Hochleistungs-Faserlaser geeignet sein, da sowohl CO<sub>2</sub>-Laser als auch Nd:YAG-Laser hinsichtlich Energie- und Raumbedarf sowie konstruktiver Auslegung und Gewicht nur mit großen Einschränkungen als mobile Systeme betrieben werden können. Der Diodenlaser wiederum, der mit gewissen Einschränkungen als mobiles System bezeichnet werden kann, ermöglicht aufgrund seiner prinzipbedingten geringeren Intensität i.d.R. unter Normalbedingungen kein

15      Tiefschweißen, so daß das Schweißen dickwandigerer Rohre nur in Mehrlagentechnik möglich wäre. Scheinbar lediglich das neue Strahlwerkzeug Hochleistungs-Faserlaser dürfte hier ein entsprechendes Potential sowie die insbesondere beim Onshore-Pipelinebau erforderliche Mobilität, Flexibilität und Robustheit des Systems bieten, so daß hier – mit sinkenden Investitionskosten – ein

20      weiteres interessantes Anwendungsgebiet für dieses Werkzeug liegen könnte.

**1.3.2 Erweiterung der Prozeßgrenzen durch das Laser-Lichtbogen-Hybridschweißen**

25      Trotz der signifikanten Vorteile des Einsatzes des Strahlwerkzeuges Laser in der Schweißtechnik, die bereits bei zahlreichen Anwendungen z.B. im Schiffbau, Straßenfahrzeugbau und jüngst sogar im Flugzeugbau nachgewiesen wurden und zum Einsatz des Lasers für zahlreiche Aufgaben in diesen Bereichen geführt haben, ergibt sich unter bestimmten Umständen der Wunsch nach einer weiteren Erweiterung der Prozeßgrenzen des Laserstrahlschweißens. Eine Möglichkeit hierzu ist die Kopplung eines Laserstrahls mit einem MSG-Lichtbogen in einer

30      gemeinsamen Prozeßzone (Schmelzbad und Prozeßplasma) zum sog. Laser-MSG-Hybridschweißen (Bild 7).

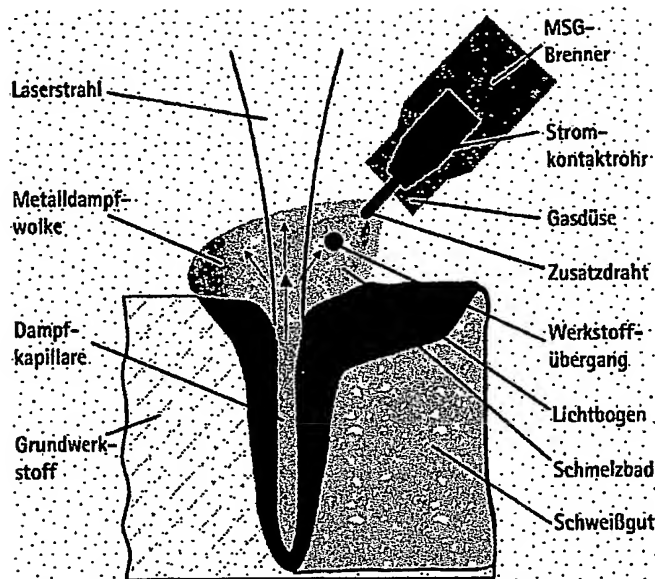


Bild 7: Prinzip des Laser-MSG-Hybridschweißens

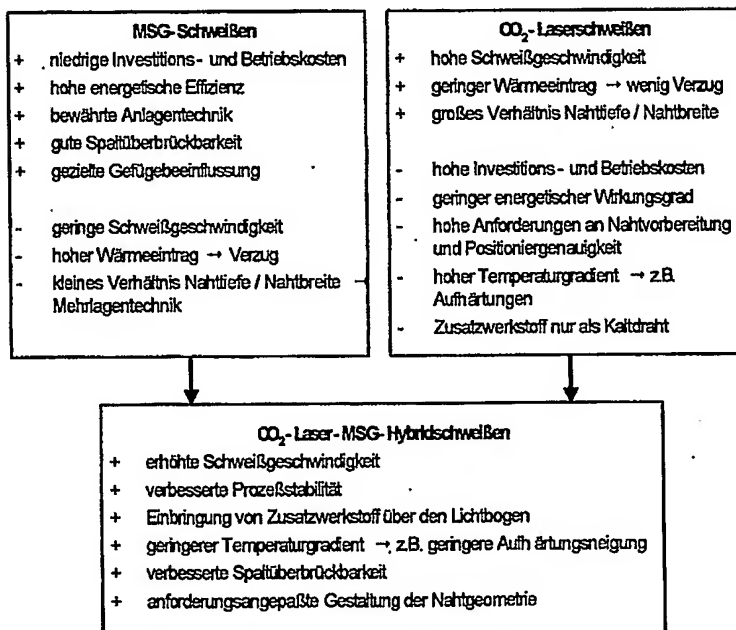


Bild 8: Potentiale des Laser-MSG-Hybridschweißens

Dabei wurde bereits gezeigt, daß sich ein Synergieeffekt ergibt, der es ermöglicht, die Vorteile des Laserschweißens und des MSG-Schweißens bei gleichzeitiger Minimierung ihrer jeweiligen Nachteile zu vereinen (Bild 8). Dadurch eröffnen sich zahlreiche interessante Anwendungsmöglichkeiten (Bild 9) insbesondere auch im Bereich des Schweißens von Mittel- und Grobblechen aus Stahl zum Beispiel beim Schweißen von Öltanks oder von Baugruppen für Offshore-Anwendungen.

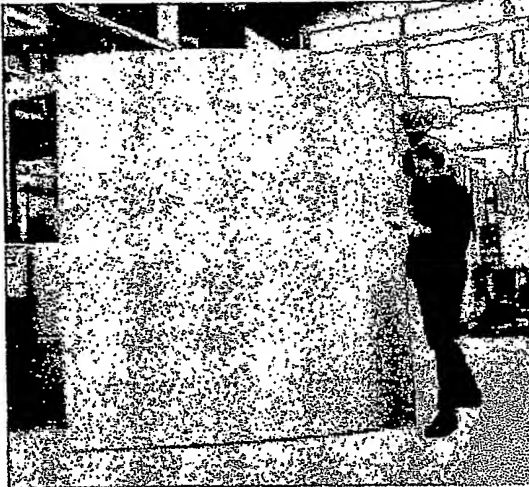


Bild 9: Anwendung des Laser-MSG-Hybridschweißens für das Schweißen von Großstrukturen aus Aluminium-Strangpreßprofilen für den Waggonbau (Fa. BIAS, Fa. Bombardier)

Grundsätzlich läßt sich feststellen, daß das Laser-MSG-Hybridschweißen besonders dann ein großes Einsatzpotential besitzt, wenn eine signifikante Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit angestrebt wird oder der Einsatz größerer Mengen von Zusatzwerkstoff aus metallurgischen Gründen, aus Gründen der Spaltfüllung oder auch infolge bestimmter Normvorschriften (z.B. ASTM A358) erforderlich ist.

### 1.3.3 Aspekte des Lasereinsatzes beim Orbitalschweißen von Pipelines – bisherige Erfahrungen

Die Laserschweißtechnik ist bisher erfolgreich in der stationären Produktion von Rohren oder anderen Maschinenbauteilen eingesetzt worden. Unterschiedliche Laserverfahren werden angeboten, aber bisher war kein für einen praktischen Einsatz auf der Baustelle beim Orbitalschweißen Laser und kein geeigneter Schweißprozeß verfügbar (s.o.).

#### Anforderungen an eine Strahlquelle

Die Vorgaben für einen Laser, der auf der Baustelle eingesetzt werden kann, sind:

- Der gesamte Schweißprozeß darf nur von außen erfolgen.
- Die Strahlquelle muß Erschütterungen und unterschiedliche klimatische Bedingungen wie Minusgrade und hohe Plusgrade vertragen können.
- Die Strahlquelle muß bis zum Laserkopf eine Entfernung von ca. 30 m überbrücken können, ohne an Leistung zu verlieren.
- Die Stromversorgung darf maximal 160kVA betragen, denn größere Stromaggregate sind auf der Baustelle nur schwer zu handhaben und somit stehen dies nicht zur Verfügung.
- Die Schweißnahtqualität darf nicht eingeschränkt werden, vor allen Dingen nicht, wenn Stähle X80, X90 oder X100 verschweißt werden. Hier ist besonders die Aufhärtungszone zu berücksichtigen.
- Die Ausbildung der Wurzel muß ohne Badsicherung einwandfrei erfolgen und es muß gewährleistet sein, daß beide unteren Kanten des Rohres miteinander verschweißt sind.
- Das Stumpfschweißen der Rohre muß ohne spezielle Nahtvorbereitung bis 15 mm möglich sein. Die Schweißgeschwindigkeit muß wesentlich höher sein als beim MAG-Orbitalschweißen.
- Die Investitionskosten müssen in einem verträglichen Rahmen der Wirtschaftlichkeit liegen.

**Bisherige Erfahrungen mit dem Lasereinssatz**

Bisher auf dem Markt erhältliche Lasersysteme vermögen diese Anforderungen nicht oder nur in eingeschränktem Maße zu erfüllen. Aufgrund der eingeschränkten Mobilität herkömmlicher Lasersysteme gab es Ansätze zum Orbitalschweißen von Lasern beispielsweise bisher nur für stationäre oder Offshore-Anwendungen, wo dieser Aspekt nur eine geringe Rolle spielt. Für den Einsatz an Land wurde kürzlich von TWI erstmals der Einsatz von Nd:YAG- oder CO<sub>2</sub>-Lasern diskutiert, ohne jedoch die Konzepte zu konkretisieren. Um die Nachteile geringer (Nd:YAG-)Laserleistungen und Qualitätsprobleme auszugleichen, wurde beispielsweise vorgeschlagen, eine MSG-Wurzel zu schweißen, dann eine Nd:YAG-Laserschweißnaht zu legen und schließlich die Decklage wieder MSG zu schweißen. Ein weiterer beschriebener Ansatz ist die Kombination des Nd:YAG- oder des CO<sub>2</sub>-Laserstrahls mit dem MSG-Lichtbogen zum Hybridschweißen. Auch hier sind bisher lediglich erste Schweißversuche unter Laborbedingungen bekannt geworden. Das bisher als am erfolgversprechendsten diskutierte Konzept für das Orbitalschweißen von Landpipelines ist das Nd:YAG-Laser-MSG-Hybridschweißen mit 4,4 kW Laserleistung, wovon man sich Schweißgeschwindigkeiten bis 1 m/min erhofft. Auch hier existieren bestenfalls Labormuster. Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß keines der diskutierten Konzepte bisher den Weg in die Praxis bzw. zum industriell anwendbaren Produkt geschafft hat und dies auch aufgrund der Tatsache, daß die obigen Anforderungen nicht erfüllt werden, kaum schaffen wird.

**Vorversuche der Fa. Vietz zum Schweißen mit dem Diodenlaser**

Die Fa. Vietz hat aufgrund dieser Situation Vorversuche mit dem Diodenlaser durchgeführt. Hier war es möglich, die Wurzel 3 mm dick stumpf zu schweißen. Alle anderen folgenden Nähte hätten mit Fülldraht nach dem MAG-Orbital-Verfahren durchgeführt werden müssen. Des weiteren hat sich bei den ersten Versuchen mit dem Diodenlaser bereits herausgestellt, daß dieser sehr störanfällig ist und bei unterschiedlichen Temperaturen in keiner Weise eingesetzt werden kann. Unter 0 °C ist ein Schweißen mit dem Diodenlaser nicht mehr möglich; die Baustellen werden jedoch auch bei Minusgraden aufrechterhalten und somit kommt das Diodenlaserschweißen nicht in betracht.

**Potential des Faserlasers**

Die neuentwickelte Strahlquelle Hochleistungs-Faserlaser erfüllt jedoch eventuell alle obigen Anforderungen. Daher wurden von der Fa. Vietz in Zusammenarbeit mit dem BIAS erste Versuche mit dem Faserlaser durchgeführt (s.u.)

**1.3.4 Ergebnisse der Fa. Vietz und des BIAS aus Vorversuchen zum Orbitalschweißen mit dem Faserlaser**

Aufgrund obiger Erwägungen dürfte der Hochleistungs-Faserlaser als Strahlquelle beim Schweißen im Dickblechbereich ein erhebliches Einsatzpotential besitzen und insbesondere für Anwendungen, die hohe Mobilität und Robustheit voraussetzen, gut geeignet sein. Der im Rahmen der Voruntersuchungen eingesetzte Faserlaser hatte eine Strahlleistung von 6,9 kW am Werkstück, der Fokussdurchmesser betrug 500 µm bei 120 mm Kollimierung und 200 mm Brennweite. Die Strahlführung erfolgte durch eine 300-µm-Faser.

Bild 10 zeigt eine Einschweißkurve für Baustahl S 235JR. Da demnächst Schweißversuche mit einem 10kW-Faserlaser geplant sind, wurde unter Zugrundelegung konservativer Annahmen die zu erwartende Einschweißkurve für 10kW Strahlleistung am Werkstück extrapoliert.

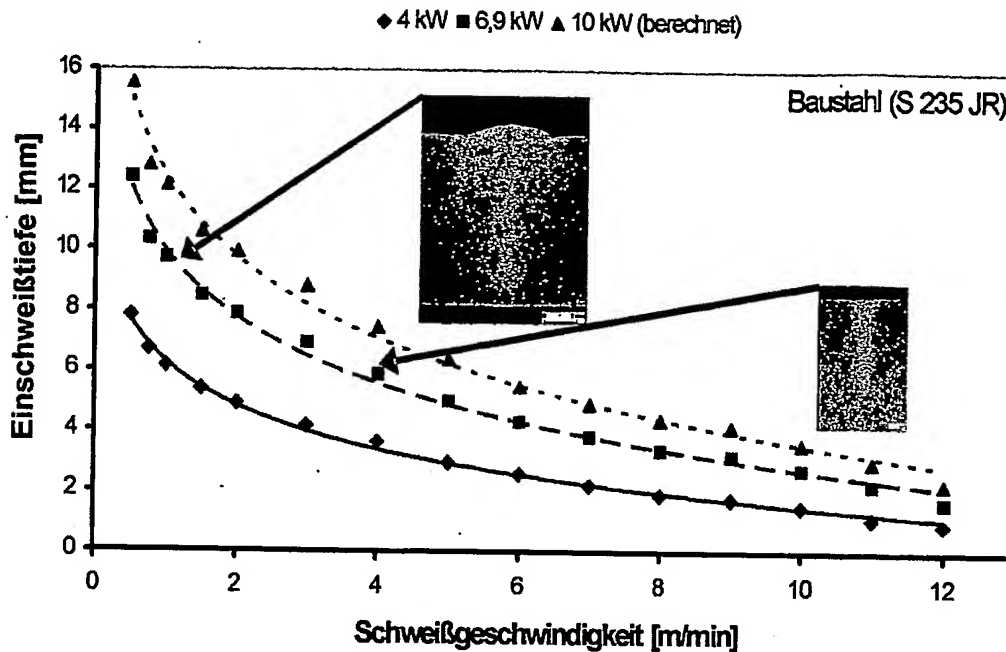


Bild 10: Einschweißkurve in Baustahl S 235JR

Bei einer Schweißgeschwindigkeit von 1,5 m/min waren mit der verfügbaren Strahlleistung in Baustahl S 235JR Einschweißtiefen von 8,5 mm realisierbar; für 10 kW ist bei 1,5 m/min eine Einschweißtiefe von mehr als 10,6 mm zu erwarten. Für eine Schweißgeschwindigkeit von 0,5 m/min wurden bei 6,9 kW Strahlleistung Einschweißtiefen von 12,4 mm erzielt; für 10 kW ist bei 0,5 m/min eine Einschweißtiefe von mindestens 15,5 mm zu erwarten.

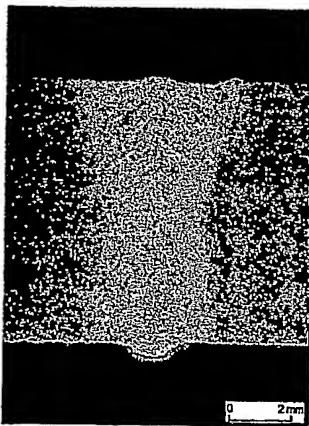


Bild 11: Querschliiff Baustahl 8 mm, I-Stoß, Strahlleistung 6,9 kW, Schweißgeschwindigkeit 1 m/min, einlagig

Bild 11 zeigt den Querschliiff einer Schweißnaht am I-Stoß (8 mm Baustahl), die mit einer Strahlleistung von 6,9 kW und einer Schweißgeschwindigkeit von 1 m/min in einer Lage erzeugt wurde.

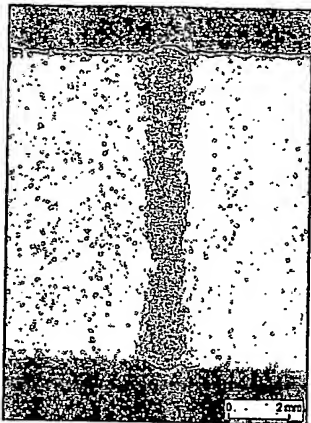


Bild 12: Querschliff Baustahl 10 mm, I-Stoß, Strahlleistung 6,9 kW, Schweißgeschwindigkeit 3,5 m/min, beidseitig geschweißt

5 Bild 12 zeigt den Querschliff einer mit 6,9 kW Strahlleistung und einer Schweißgeschwindigkeit von 3,5 m/min beidseitig geschweißten Naht (10 mm Baustahl, I-Stoß).

10 Bild 13 zeigt eine Einschweißkurve für einen nichtrostenden Stahl. Bei einer Schweißgeschwindigkeit von 1,5 m/min waren mit der verfügbaren Strahlleistung in nichtrostendem Stahl Einschweißiefen von 8,6 mm realisierbar; für 10 kW ist bei 1,5 m/min eine Einschweißtiefe von mehr als 10,7 mm zu erwarten. Für eine Schweißgeschwindigkeit von 0,5 m/min wurden bei 6,9 kW Strahlleistung Einschweißiefen von 11,9 mm erzielt; für 10 kW ist bei 0,5 m/min eine Einschweißtiefe von mindestens 14,6 mm zu erwarten.

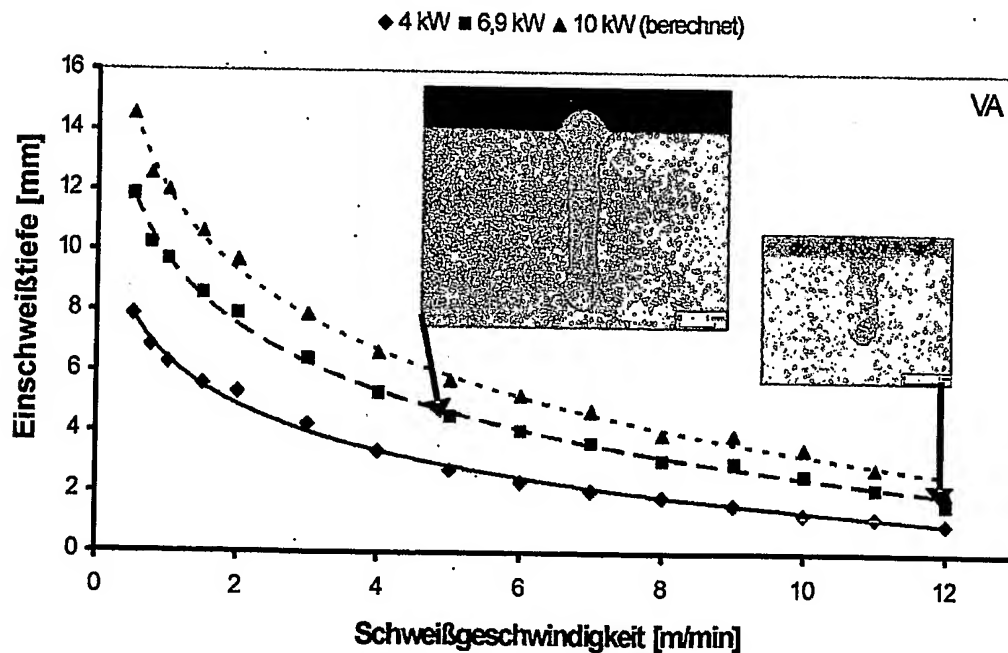


Bild 13: Einschweißkurve in nichtrostendem Stahl VA

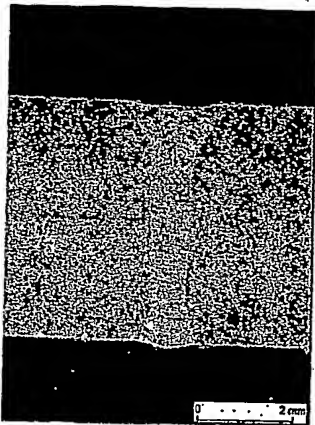
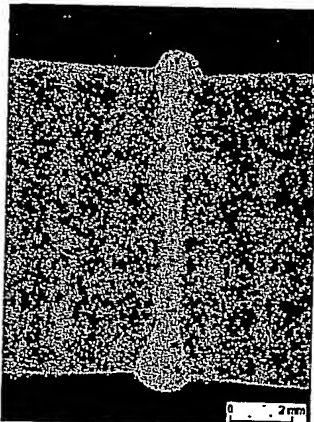


Bild 14: Querschliff VA 5 mm, I-Stoß, Strahlleistung 6,9 kW, Schweißgeschwindigkeit 3,5 m/min, einlagig

5

Bild 14 zeigt einen Querschliff einer Schweißnaht (VA, 8 mm), die mit einer Strahlleistung von 6,9 kW und einer Schweißgeschwindigkeit von 3,5 m/min in einer Lage erzeugt wurde.



10

Bild 15: Querschliff VA 10 mm, I-Stoß, Strahlleistung 6,9 kW, Schweißgeschwindigkeit 4 m/min, beidseitig geschweißt

15

Auch an VA (10 mm, I-Stoß) wurden beidseitige Schweißungen durchgeführt. Bild 15 zeigt den Querschliff einer mit 6,9 kW Strahlleistung und einer Schweißgeschwindigkeit von 4 m/min erzeugten Naht.

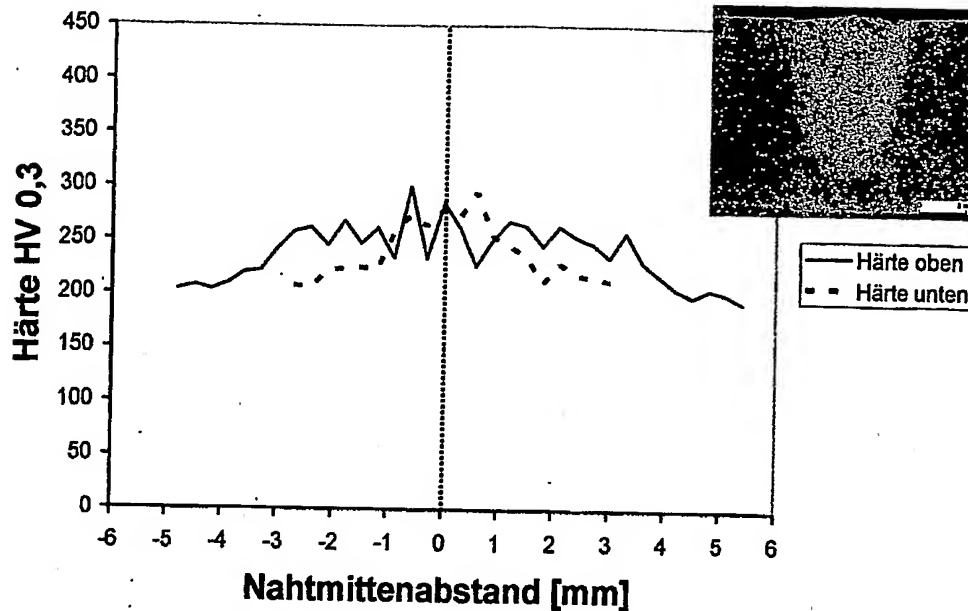
20

Zusammenfassend kann – basierend auf den erstaunlichen Ergebnissen der Vorversuche – gesagt werden, dass es in Abhängigkeit von der gewählten Schweißstrategie möglich ist, qualitativ hochwertige Schweißnähte mit Schweißgeschwindigkeiten bis zu 4 m/min bei 10 mm Materialdicke zu erzeugen. Diese Ergebnisse sind so überraschend, daß weitere Versuche durchgeführt wurden, die vermuten lassen, daß die Schweißgeschwindigkeit für einen Rohrstoß von 1.016 mm Durchmesser und 15 mm Wanddicke 3 Minuten beträgt. In dieser Zeit kann eine komplette Schweißnaht geschweißt werden.

25

Ein Härteprofil einer mittels Faserlaser hergestellten Naht zeigt Bild 15.





## 2 Beschreibung des Verfahrens und des Anlagenkonzeptes

Aufbauend auf diesen Untersuchungen, die überraschende Ergebnisse gezeigt hatten, wurde folgendes Verfahren und Anlagenkonzept entwickelt:

### Anwendungsgebiet

Das beschriebene Verfahren bzw. die beschriebenen Vorrichtungen beziehen sich insbesondere auf o.g. Anwendungen beim Orbitalschweißen bevorzugt von an Land zu verlegenden Pipelines, aber auch für den stationären oder für den Offshore-Einsatz. Das Verfahren ist prinzipiell für alle metallischen Werkstoffe geeignet, soll aber bevorzugt bei Stahlwerkstoffen zur Anwendung kommen. Das Verfahren und die Orbitalschweißvorrichtung eignen sich für nahezu beliebige Rohrdurchmesser und Wanddicken, sollen aber bevorzugt bei Rohren im Durchmesserbereich von 50 mm bis 1.500 mm und im Wanddickenbereich von 2,5 mm bis etwa 25 mm zur Anwendung kommen.

### Wesentliche Bestandteile der Vorrichtung

Wesentlicher Bestandteil der gesamten zur Durchführung der Orbitalschweißung benötigten Vorrichtung (im folgenden Orbitalschweißvorrichtung genannt) sind einer oder mehrere Hochleistungs-Faserlaser beliebiger Wellenlänge (bevorzugt 1070 nm) und Strahleigenschaften mit Strahlleistungen von bis zu je 100 kW, die ggf. mittels einer schwingungsgedämpften Aufhängung auf dem Transportfahrzeug befestigt sind. Der Hochleistungs-Faserlaser ermöglicht sowohl die Erzeugung kontinuierlicher Laserstrahlung (cw-Betrieb) als auch die Erzeugung gepulster Laserstrahlung mit Pulsfrequenzen bis zu 20 kHz und beliebigen Pulsformen. Des weiteren kann die Orbitalschweißvorrichtung eine oder mehrere (bevorzugt frei programmierbare Inverter-)Stromquellen zum MSG-Schweißen sowie entsprechende Drahtfördereinrichtungen enthalten. Alternativ kann die Orbitalschweißvorrichtung auch mit einer oder mehreren Einrichtungen zur Förderung von Kalt draht oder Heißdraht ausgestattet sein. Außerdem umfaßt die Orbitalschweißvorrichtung auf dem Transportfahrzeug angebrachte Einrichtungen zur Stromversorgung sowie einen Kühler für den Hochleistungs-Faserlaser. Die Orbitalschweißvorrichtung umfasst

5 ferner eine dem Stand der Technik im wesentlichen entsprechenden Vorrichtung zur  
Außenzentrierung oder zur Innenzentrierung mit der Möglichkeit des genauen  
Ausrichtens der Rohrenden unter Berücksichtigung von Kantenversatz sowie ggf.  
Luftspalt. Ferner besitzt die Orbitalschweißvorrichtung einem Spannband, das außen  
um das Rohr gelegt und arretiert wird. Dieses Spannband dient der Führung eines  
Arbeitskopfes oder mehrerer Arbeitsköpfe zur Durchführung von Schweißungen von  
außen. Die Innenzentrierung umfaßt ggf. ebenfalls entweder einen oder mehrere  
Arbeitsköpfe zur Durchführung von Schweißungen von innen oder alternativ  
beispielsweise Kupferbacken zu Badabstützung oder Möglichkeiten zur  
10 wurzelseitigen Zufuhr von Formiergas.

15 Der Arbeitskopf (bzw. die Arbeitsköpfe), der ebenfalls Bestandteil der  
Orbitalschweißvorrichtung ist, wird selbstbeweglich mittels einer Vorschubeinheit  
(bevorzugt elektromotorisch) entweder außen auf dem Spannband oder innen mittels  
der Innenzentriervorrichtung geführt. Er besteht aus einem optischen System  
(Linsensystem oder Spiegelsystem) zur Führung und Formung des Laserstrahls, ggf.  
einem bevorzugt lichtoptischen Nahtfolgesensor, ggf. einem bevorzugt lichtoptischen  
Sensor (nachlaufend) zur Kontrolle der Nahtqualität (Nahtqualitätssensor) sowie ggf.  
20 entweder einem MSG-Brenner oder einer Vorrichtung zur Zufuhr von Kaltdraht oder  
Heißdraht sowie ggf. einer oder mehreren weiteren Düsen zur Zufuhr von Schutzgas.  
Das optische System, ggf. der Nahtfolgesensor und / oder der Nahtqualitätssensor  
sowie ggf. der MSG-Brenner oder ggf. die Zufuhreinrichtung für Kaltdraht oder  
Heißdraht sind dabei gemeinsam bevorzugt servomotorisch in bis zu sechs Achsen  
25 gegenüber der Vorschubeinheit auch während des Schweißprozesses verstellbar.  
Außerdem sind ggf. der MSG-Brenner oder ggf. die Zufuhreinrichtung für Kaltdraht  
oder Heißdraht gegenüber dem aus der Optik austretenden Laserstrahl in bis zu  
sechs Achsen verstellbar. Der Laserstrahl wird dem Arbeitskopf über eine  
Lichtleitfaser zugeführt, der Draht ggf. über eine entsprechende  
30 Drahtfördereinrichtung; ggf. ist eine Einrichtung zur Erwärmung des Heißdrahtes  
(stromlos oder mit Strom) vorhanden. Die Verbindung zwischen Stromquelle und  
MSG-Brenner erfolgt über elektrische Kabel; die Gaszufuhr sowie die  
Kühlmittelzufuhr über entsprechende Schlauchsysteme. Ggf. umfaßt der Arbeitskopf  
außerdem ein Kamerasystem, das dem Schweißer die Beobachtung des  
Schweißprozesses am Monitor ermöglicht.

35 Des weiteren umfaßt die Orbitalschweißvorrichtung einen Steuerrechner zur  
Ansteuerung aller wesentlichen Bestandteile der Vorrichtung. Insbesondere  
ermöglicht er ggf. die Bahnführung des Arbeitskopfes anhand der Informationen des  
Nahtfolgesensors sowie eine Veränderung wesentlicher Schweißparameter während  
40 des Schweißprozesses.

Schließlich umfaßt die Vorrichtung geeignete Abschirmeinrichtungen zum Schutz des  
Bedienpersonals vor der Laserstrahlung sowie geeignete Einrichtungen zum Schutz  
45 der Schweißstelle vor schädlichen Umgebungseinflüssen (z.B. Zugluft).

#### Beschreibung des Verfahrens

Als Prozeß- und Schutzgase kommen inerte und ggf. aktive Gase wie z.B. bevorzugt  
Argon, Helium, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> oder O<sub>2</sub> in geeignetem Mischungsverhältnis sowie ggf. auf  
50 den zu verschweißenden Werkstoff abgestimmte drahtförmige Zusatzwerkstoffe  
(Massivdraht oder Metallpulverfülldraht) zum Einsatz. Ggf. kommen die erwähnten  
Gase auch als Gase für den Wurzelschutz in Betracht.

Die Zentriervorrichtung (innen oder außen) dient der genauen Ausrichtung der ggf.  
mit einer entsprechenden Nahtvorbereitung (bevorzugt I-Stoß, Y-Naht oder  
55 Tulpennaht) vorbereiteten Rohrenden mit oder ohne definiertem Spalt und  
minimiertem Kantenversatz.

Die Schweißung kann dabei mit verschiedenen ggf. gemeinsam nacheinander oder gleichzeitig eingesetzten Prozessen von innen und / oder von außen in einer oder mehreren Lagen durchgeführt werden. Insbesondere sind mit den beschriebenen Vorrichtungen folgende Schweißprozesse denkbar:

- Faserlaser-MSG-Lichtbogen-Hybridschweißen (als MSG-Lichtbogentypen sind hier bevorzugt Kurzlichtbogen, Sprühlichtbogen und Impulslichtbogen möglich): beide Prozesse wirken in einer gemeinsamen Prozeßzone
- Kombiniertes Faserlaser-MSG-Lichtbogenschweißen (als MSG-Lichtbogentypen sind hier bevorzugt Kurzlichtbogen, Sprühlichtbogen und Impulslichtbogen möglich): beide Prozesse wirken nicht in einer gemeinsamen Prozeßzone
- Faserlaserstrahlschweißen
- Faserlaserstrahlschweißen mit Kaltdraht
- Faserlaserstrahlschweißen mit Heißdraht
- Faserlaserstrahlschweißen mit potentialfreiem Heißdraht

Ggf. können vor der eigentlichen Verbindungsschweißung Heftschweißungen durchgeführt werden.

Die Schweißungen erfolgen mit dem gewählten Prozeß / den gewählten Prozessen entweder in fallender Richtung (von oben nach unten) oder in steigender Richtung (von unten nach oben) mit einem oder mehreren gleichzeitig oder zeitversetzt von außen und / oder innen schweißenden Arbeitsköpfen. Während des Schweißprozesses können wesentliche Schweißparameter (bevorzugt Spannung, Drahtvorschub und Laserleistung) frei eingestellt und damit der Schweißposition mit Hilfe des Steuerrechners angepaßt werden.

#### WHAT IS CLAIMED IS:

1. A device substantially as illustrated and described in the foregoing disclosure.
2. A method substantially as illustrated and described in the foregoing disclosure.

